

宇宙暗黒時代の夜明け

いえ まさのり



自然科学研究機構国立天文台光赤外研究部・教授。理学博士。ELTプロジェクト長。

1977年東京大学大学院理学系研究科博士課程修了。同年同大学理学部助手、86年同大学東京天文台助教授を経て、92年より現職。専門は観測的宇宙論、望遠鏡・観測装置開発。

1999年第47回菊池寛賞、2006年日本光学会光設計特別賞、2008年仁科記念賞受賞。著書に『地球と宇宙の事典』(岩波書店、2000年)、『すばる望遠鏡』(岩波書店、2002年)、『宇宙の観測I—光・赤外天文学』(日本評論社、2007年)などがある。

- 参考図書
1 杉山直・『宇宙 その始まりから終わりへ』(朝日新聞社、二〇〇三年)

普通は確信できないわけです。彼らも、まず自分らの観測装置を疑いました。ラジオの性能が悪いんじゃないか、ハトのフンのせいじゃないかと。ハトのフンがあるとちょっとアンテナが暖まつて雑音がでるといったことが、「白い誘電体が付着して」と書いてあります。その白い誘電体をはがしたり、ありとあらゆることを一つずつ潰しています。それが一つのストーリーになっています。ありとあらゆることをすべて潰しても、まだ残っていた。それが必ずしもシングナルであるのかどうかは、確かに最後までわからない面はあります。しかし、たまたまそのとき、ビッグバンだったらこのぐらいのシグナルがくるはずだという理論予想をたてて、それをうけるための望遠鏡をつくろうとしていたグループがすぐそばにいたんです。プリンストン大学のロバート・ディッケという偉い先生に率いられたグループです。たまたまこの人たちと連絡して「予想通りのところにきてる」。つまり、最後には理論的な予想と結びつけたのです。それがなければ、原因不明の雑音成分が残っているとしかわからないわけです。シグナルであることがどこかで別の人気に気づかれたという面はあります。しかし、ベンジャスとウイルソンがすごかつたのは、ありとあらゆるものを見全部落としていつた、考えられることをすべて落としていつた実験観測屋としての手腕ということになると思います。

杉山先生から大変わかりやすいお話をありました。私は杉山先生がお話をされた宇宙暗黒時代の夜明けをみるという話です。一番遠い銀河を発見しましたが、それがどんな意味をもつているかという話を中心にして、これから天文学研究を続けるうえで重要な「補償光学」というハイテク技術と次世代望遠鏡の話をさせていただきます。

最遠銀河の発見とその宇宙論的意義

♪いちばんぼし みつけた

あれあの森の

杉の木の上に♪

一番、二番は歌いませんのでご安心ください（笑）。

われわれの知っている一番星は、多くの場合、宵の明星（＝金星）か木星です。これは夕方になつて急に輝きだすものではなく、当然ながら昼間でも太陽の光を反射して輝いていますが、日の空は太陽の散乱光が強いので星はみえません。黄昏時になつて空が暗くなつてみるとみえるのが一番星です。

私たちは宇宙の進化を理解するために宇宙で最初に輝きだす星をみたいわけです。どの星が最初に輝きだしたのかを特定することはほとんど不可能ですが、最初の星や銀河が誕生した時代がどんな時代かについて、観測装置や望遠鏡の工夫によってだんだん迫ることができるようになつてきました。

ところで、国立天文台の敷地内には三鷹市で唯一の古墳があります。一週間ほど前に見学会がありました。大和朝廷時代とみられる上円下方墳という大変ユニークなものでした。考古学者は地層を発掘して出土するさまざまな土器や化石から人類の生活や地球の歴史を調べています。深いところを掘れば掘るほど昔がみえてくることから、考古学者は地層を掘り下げています。天文学者は、宇宙の歴史を調べるためにより遠くをみようとします。それが宇宙考古学です。遠くの天体からの光は、われわれに届くまでに光の速さといえども時間がかかります。したがって、遠くの宇宙をみればみるほど昔の宇宙の姿をみていることになります。天文学では、遠い宇宙をみることで宇宙の過去を直接みることができるというおもしろい事情があります。

今日もたくさん理論の先生がお話しされます。理論の先生は頭がよいですから、おっしゃることは九〇%は正しいのです。人によっては三〇%かもしれません（笑）、でも、事実は小説よりも奇なります。宇宙自体は理論家の発想を超えてもつと自由な発想をしているようです。宇宙が加速膨張していることを、十年前にいた人はいましたが、大勢は信じていませんでした。実際に超新星の観測やマイクロ波背景放射異方性観測衛星WMAP（ダブリューマップ）の観測で、疑いようのない事実として証明されたわけです。

最初の星や銀河がどのように誕生したかについて、いろいろな理論がありますが、実際に観測していくと予想と違った事実に遭遇することがあります。ですから観測は非常に大事です。観山先生ぜひ予算の獲得をお願いします。

宇宙年代を測る物差し—赤方偏移

宇宙の年代をさかのぼるうえで、赤方偏移という概念がでてきます。これは膨張している宇宙の大きさの目安です。赤方偏移(z)は、観測した天体の光の波長が本来の波長から伸びた割合と定義します(表1)。赤方偏移 z が $0 \cdot 1$ というのは、波長が 10% 長い赤い光のほうに伸びていることを示しますが、それは宇宙の大きさが 10% 小さかつた時代の天体であることを意味しています。すなわち、宇宙の大きさが現在に比べて $1/(1+z)$ であつた昔をみていることになります。

杉山先生がお話しされた宇宙マイクロ波背景放射の時代は、赤方偏移でいうと一千の時代で、標準宇宙論でいうとビッグバンから三十八万年後です(表1)。最初の星が誕生した時代は、このあと吉田先生がお話しになりますが、赤方偏移二十前後だと考えられ、ビッグバンから三億年前後となります。ただし、この時代をまだ誰もみていません。

宇宙膨張が進んで冷えていった宇宙は、星が誕生し始めると、新しく誕生した星からの強い紫外線によって再び暖められ、中性になつた水素原子が再び電離を始めます。これを「宇宙の再電離」といいます。赤方偏移六の時代、ビッグバンから十億年後の時代には、宇宙はほとんど完全に電離していたことが最近の観測でわかっています。

そして、赤方偏移が六と二十のあいだを観測的につめていくことが、世界中の天文学者が今、

一生懸命やろうとしている研究です。

人類がみた一番遠い銀河の世界記録が過去数十年間にどうかわってきたかを図1に表しています。私が大学院にはいった一九七二年ころは、「まだ赤方偏移」でも、「すごく遠いのが見つかった」という時代でした。やがて四メートル級望遠鏡が活躍し始めました。当時は写真乾板を暗室で現像する時代でしたが、その後、電子カメラCCDが登場して感度が非常に上がり、さらに八メートル級望遠鏡が動きだして赤方偏移の記録がどんどん伸びていきます。すばる望遠鏡が活躍し始めた二〇〇〇年ごろから、この分野ではすばる望遠鏡が独走を始め、赤方偏移五・七と六・六の時代の観測で世界をリードする成果をあげました。

そして二〇〇六年に、現在世界記録になつてある赤方偏移七・〇という天体を私たちが一個だけ発見しました。まだ一個しかありません。

最遠銀河の探査法

遠い銀河はどんな性質をもつていて、どのようなものを探したらよいのかということに関して、一九六七年にパートリッジとピーブルスが重要な論文を発表しています。宇宙のなかで冷えたガスにだんだんムラムラができ、そのムラムラの濃い領域で最初の星が生まれます。そして、その星の中心で核融合反応が起こり、一人前の星として光ります。最初に生

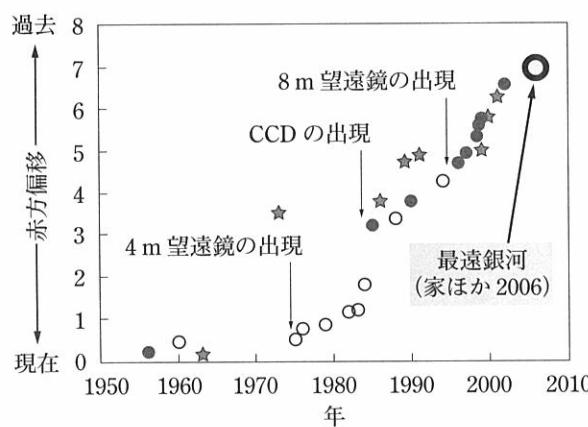


図1 人類がみたもっとも遠い銀河の記録更新の歩み

表1 赤方偏移 z の定義 標準宇宙モデルでの赤方偏移とビッグバン後の経過年数

- 赤方偏移 $z = \delta\lambda / \lambda = \text{波長増加率}$
 ・宇宙の膨張の目安
 赤方偏移 z では宇宙の大きさは $\frac{1}{1+z}$ 倍であった。
 ・赤方偏移 z の天体の光は波長が $1+z$ 倍に伸びる

イベント	赤方偏移	ビッグバン後
宇宙晴れ上がり (宇宙背景放射)	1,000	0.0038 億年
最初の星誕生 (再電離開始)	20	3 億年
宇宙の夜明け (再電離完了)	6	10 億年
地球の誕生	0.45	91 億年
現在	0	137 億年

まれる星は、重い星から軽い星までいろいろですが、重い星ほど非常に明るく輝き、その星は非常に熱いので強い紫外線を放射します。それによって、周りに漂っている水素ガスを暖めて再び電離します。この電離した水素ガスが冷えて、水素原子の周りを回っている電子が一番目の軌道から一番下の基底軌道へ落ちるときに強いライマン α 輝線を放射します。このライマン α 輝線の波長は、本来であれば百二十一ナノメートルの紫外線ですが、膨張宇宙で赤方偏移してくると、これが可視光になつたり赤外線となつて観測できるようになります。そういうものをとらえなさいと提唱しました。

この論文が一九六七年に発表されてから、世界中の天文学者がいろいろな工夫をして観測したのですが、失敗の連続でした。今から振り返ると、このような銀河は実際に存在するものの、四メートル望遠鏡でも光が足りないくらい非常に暗いため見つからなかつたのです。それに、このような原始銀河は、その後生まれた数多くのより明るい銀河のあいだに埋もれているため、ほんとうに何百万個という

単位で探していかないと見つかりません。

すばる望遠鏡での最遠銀河の探索

そこで、すばる望遠鏡の活躍が始まります。すばる望遠鏡はその望遠鏡の主焦点にカメラをもっています(図2)。これは現在、世界ですばる望遠鏡しかもつていらない、非常に視野の広いカメラです。この主焦点カメラでは満月の大きさほどの視野の夜空を一度に撮ることができます。それに對して、ハッブル宇宙望遠鏡で撮影できるのは、すばる望遠鏡の百分の一以下の狭い領域です。ですから非常に数少ない銀河を探そうとしてもなかなか発見できません。

それから画質です。地上のすばる望遠鏡はゆらぐ空気を通してみてているため、本来、ハッブル宇宙望遠鏡にはかなわないはずですが、非常によい望遠鏡にしたおかげで感度もほとんど引き分けです。そのことがすばる望遠鏡が活躍している一番の理由です。

そして、私たちすばる望遠鏡の宇宙論の研究グループは、遠い銀河が放つ水素のライマン α 輝線の専用フィルターを

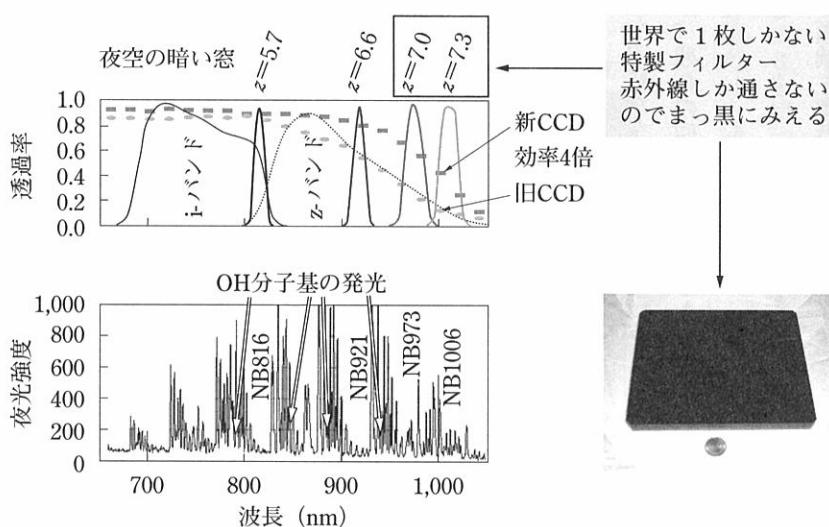


図3 地球大気中のOH分子基の発光スペクトルとすばる望遠鏡の遠方銀河探査に用いた特製フィルター群の特性

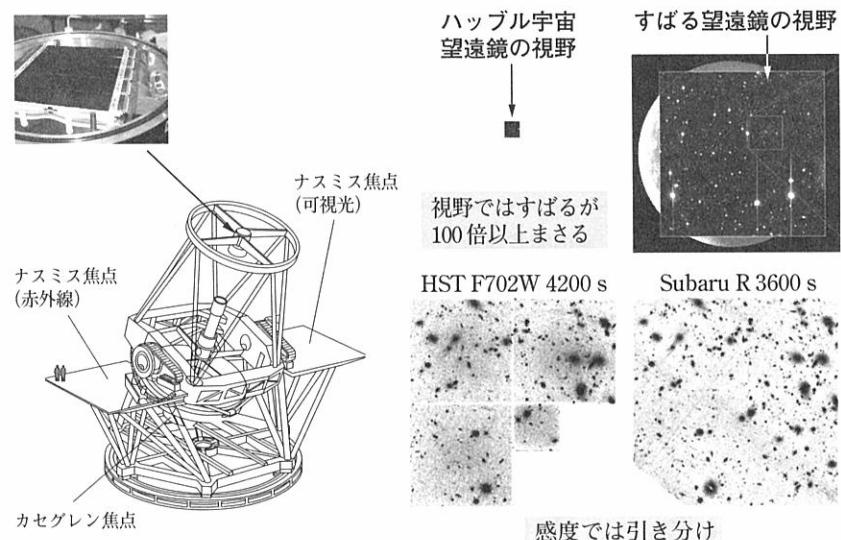


図2 すばる望遠鏡の広視野主焦点カメラ(写真:M Iye, PASJ, 52, 9-23, 2000より
(社)日本天文学会の許可を得て転載)

開発しました(図3)。ライマン α 輝線は赤方偏移してきますが、じつは地球の高度百キロメートルほどの上層大気にはOH分子基が存在しており、これがほてっています。したがって、赤い光より波長の長い赤外線の領域では夜空もけつこう明るいのです。ただし、この明るい光はそれぞれ特定の波長で光っていますので、ところどころにOH分子基が発光していない窓があります(図3)。その暗い窓から遠い宇宙を見通すことができます。

そこで、この暗い窓の光だけを通すようなフィルターを何種類か開発しました。具体的には、赤方偏移五・七のライマン α 輝線をとらえるフィルター、六・六のライマン α 輝線をとらえるフィルターの二つを使った観測を大々的に行つて、遠方の銀河の記録をどんどんためていったのです。

次に、もう少し欲張つて赤方偏移七・〇の専用フィルターを開発しました(図3)。可視光をまったく通さず、波長九百七十三ナノメートルの赤外線しか通しませんのでまっ黒です。このフィルターを使って、すばる望遠鏡で十五時間、空のある領域を観測したところ四万一千五百三十三個の銀河が写りました(図4)。このなかで私たちが探し求めていた銀河は一個しかありませんでした。五つほど候補があつたのですが、残りの四個は偽物でした。

百一十九億年昔の最遠方銀河の発見

最遠方銀河「IOK-1」をどうやって発見したかというと、同じ領域を青のフィルターB、黄

色いフィルターV、赤いフィルターR、赤外線の*i'*、*j'*と名づけた二種類のフィルター、それと私どもが開発したライマン α 輝線だけを通すフィルターNB973を使って撮影します。そして、ほかのフィルターでは何も写っていないのに、ライマン α 輝線だけを通すフィルターを使つたときだけに写っている天体を探したのです(図5)。実際、IOK-1のスペクトルを測定すると、破線で示したライマン α 輝線の典型的なスペクトルと非常によく似たスペクトルが得られました(図5)。これで『ネイチャ』誌でも世界記録と認知されました。

ちなみに、天文学者は普通、天体の名前を座標で表しますが、無味乾燥です。ちょっとわがままな私たちは、新しい天体には命名権があると勝手に決めて、主な観測をした私と大学院生の太田一陽さん、准教授の柏川伸成さんの三人でIOK-1と名づけました。これが現在でも世界記録の銀河の名前になっています。

この観測を『ネイチャ』誌で発表したのが二〇〇六年九月の十四日です。今日から七百四十日前です。じつは毎日数えているのですが(笑)、いまだにその当時のベストテンの記録は、赤方偏移が確認された銀河という意味ではかわって

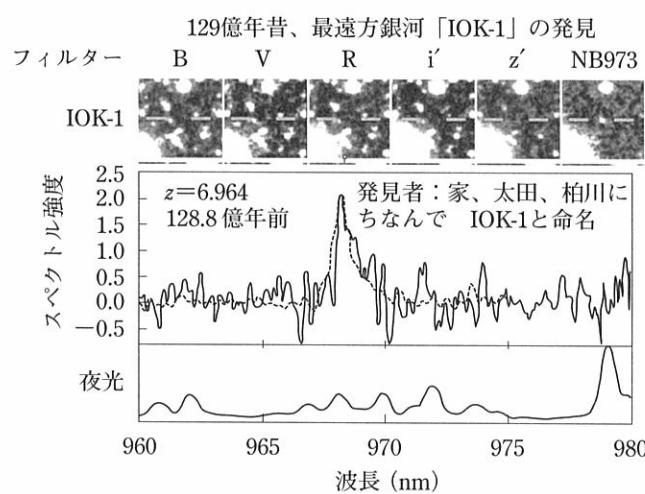


図5 NB973でしかみえない最遠銀河IOK-1の画像とそのライマン α 輝線スペクトル(Iye et al: A galaxy at a redshift $z = 6.96$, Nature, 443, 186, 2006より転載)

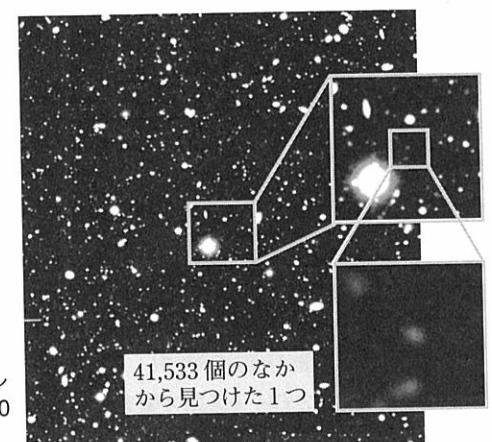


図4 フィルターNB973で撮影した画像から発見した赤方偏移7.0の最遠銀河IOK-1

おりません（表2）。

ただし、この記録は必ずいつか破られます。この発見をした日と今日が、宇宙史のなかで特別な日であるということがない、乱数的に起こったと考えますと、いつ破られるかを統計学的に計算することができます。九五%の確率で、次の世界記録は一番早ければ十九日後、一番遅いと七十九年先に樹立されます。でも、そんなに待つ必要はないと思います。私ども自身が十月二十八日、二十九日に赤方偏移七・三のフィルターで二晩観測しますので、運がよければ一か月後に世界記録を再更新できます。

表2をみていただくとIOK-1だけ赤方偏移が七で、残りは全部六・六です。六・六でこんなに見つかっているのに、七では一生懸命観測したにもかかわらず一個しか見つかっていません。じつは五個ほど見つかると思っていたんですが、一個しか見つかりませんでした。このことが重要な意味をもつていると私たちは考えています。銀河の数が赤方偏移五・七から六・六、七・〇と予想より減っているんです。このことを深刻に考えています。

宇宙の夜明けに迫る

ライマン α 輝線は中性の水素原子が放射する光です。途中に中性の水素原子があると吸収され、再び放射されるという共鳴散乱現象を起こします。したがって、宇宙が完全に電離していれば、ライマン α 光に対して透明ですが、宇宙の電離が終わっていないとライマン α 光は中性水素原子に散乱されてしまうため、遠くへいくと観測にくくなります。そのような考え方で宇宙の中性水素原子の量を計算すると、図6のようになります。すなわち、赤方偏移七までみると、宇宙の再電離の終わりの時期に踏み込んだらしいと私たちは考えています。

ビッグバンから三十八万年後に宇宙は十分冷えて中性の水素ガスが生まれ、そこから先は自ら光るもののがなくなつたので暗黒時代と呼びます。いつ最初の星が誕生したかよくわかりませんが、三億年後ころに誕生し始め、その明るい星で宇宙が再び暖められて電離が始まります。これが宇宙の再電離期です。暗黒時代から宇宙が次第に夜明けに向かっていくわけです。

すばる望遠鏡でビッグバンから十億年ほどまでの時代の観測を精力的に行い、私たちは今ビッグバンから七億八千万年ころの時代まで踏み込んでいます。もう少し先までいけると思いますが、

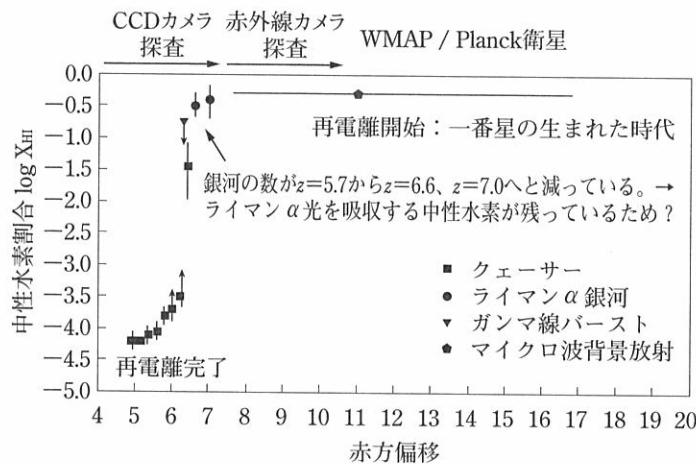


図6 中性水素原子の割合と赤方偏移の関係

表2 もっとも遠い銀河ベストテン (2008年9月23日現在)

遠方銀河のギネス記録保持 (今日で740日目)

*統計的には今日から19日後から79年後までのあいだに破られる(95%確率で)

* 10月28～29日に赤方偏移7.3の銀河探査の観測を予定(新記録への期待)

順位	天体名	座標	赤方偏移	距離*	論文	公表日
1	IOK-1	J132359.8+272456	6.964	128.826	家ほか	2006年9月14日
2	SDF ID1004	J132522.3+273520	6.597	128.250	谷口ほか	2005年2月25日
3	SDF ID1018	J132520.4+273459	6.596	128.248	柏川ほか	2006年4月5日
4	SDF ID1030	J132357.1+272448	6.589	128.238	柏川ほか	2006年4月5日
5	SDF ID1007	J132432.5+271647	6.580	128.222	谷口ほか	2005年2月25日
6	SDF ID1008	J132518.8+273043	6.578	128.219	谷口ほか	2005年2月25日
6	SDF ID1001	J132418.3+271455	6.578	128.219	小平ほか	2003年4月25日
8**	HCM-6A	J0123954.7-013332	6.560	128.189	Huほか	2002年4月1日
9	SDF ID1059	J132432.9+273124	6.557	128.184	柏川ほか	2006年4月5日
10	SDF ID1003	J132408.3+271543	6.554	128.178	谷口ほか	2005年2月25日

* 距離は宇宙年齢を136.6億歳とするモデルによる値。単位は億光年。

** この銀河のみケック望遠鏡で発見されたが、ほかはすべてすばる望遠鏡による発見。

三億年のところにいくためには赤外線カメラが必要になります。これはまた少し難しく、いろいろな工夫が不可欠ですが、そういうところに観測家は今チャレンジしているわけです。

次世代の観測を担うハイテク技術——補償光学

ここで話は急にかわります。次世代の観測で非常に重要な「補償光学」のお話をさせていただきます。これはボケを直してしまうハイテク技術です。

私も昨日、お風呂からあがつて、さて仕事をしようと思い、腕時計をつけようとして風呂場とか書斎とかを探したのですが、どこにもありません。ふと腕をみたらもうついていたんです。そういうボケを治す技術を開発すると、ノーベル賞ものだと思いますが、それはちょっとできません。しかし、天文学には非常に役に立つ技術です。

すばる望遠鏡は地球の大気を通して観測しています。大気は揺れていますから星を観測するとチラチラ揺れます。お星様がキラキラ輝いて恋人たちにはロマンチックでよいのですが、天文学者にはロマンチックはダメです。揺れたら困るんです。この光の揺れ具合を波面センサという装置で一秒間に一千回ほど測定して、その揺れ具合を直すように小さな薄い鏡（可変形鏡）を一秒間に

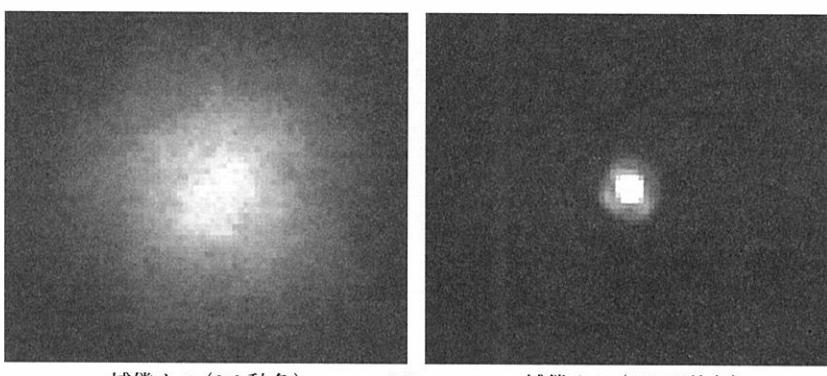


図8 補償光学による星像のにじみの改善

一千回ピヨコピヨコと動かします（図7）。すると、真空中でみているのと同じような解像度になります。これが補償光学という大変なハイテクの原理です。

私たちは一世代目の補償光学装置を開発し、二〇〇六年十月、制御素子数百八十八素子の補償光学系をすばる望遠鏡で実験しております。すばる望遠鏡はハワイのマウナケア山頂の空気のゆらぎの少ないところにあり、よい望遠鏡に仕上げたおかげで世界でも見え味がいい望遠鏡として定評があります。しかしながら拡大してみると、星の像はにじんでいます（図8左）。これでも角度で〇・六秒角ですから世界でもトップクラスのシャープな画像ですが、うんと拡大してみるとボケています。ところが補償光学装置をかませると、散らばっていた光が一か所に集まつて直径が十分の一に縮みます。その分、薄まつていた光が中心に集まるため明るくなつてみやすくなります（図8右）。こういう技術です。

図9は、オリオン大星雲のトラベジウム、四つ星という領域のカラー画像です。一九九九年にすばる望遠鏡のファーストライトのときに、この補償光学がなくて裸眼で撮った画像と比べてください。同じ領域を補償光学系を使うと、見え味、解像度が向上します。この装置は六億円の科研費をいただいて開発しましたが、四百億円の望遠鏡の解像度を一・五%の追加

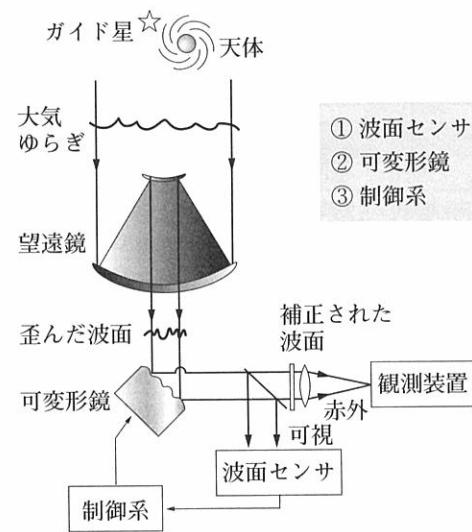


図7 補償光学の原理

予算で十倍にしました。有効な投資とみていただけないかなと思つております。

タイタンの大気のレンズ効果の初確認

次は、よく目をこらしてご覧いただければと思います。大変印象的なビデオなのでお借りしてきました。それは、土星の衛星タイタンに望遠鏡をロックして、タイタンが星座のなかを動いていくとき補償光学を効かせながら観察したビデオです（図10）。後ろの二つの星は普通の遠くの星で、その前をタイタンが通過していくきます。二つの星にリングがみえていますが、これは回折リングといつて、画質が理論的な限界にまでシャープになつていてことを意味しています。

もう一回やりますと、後ろへ隠れたとき、上をツルつと光がみえますね。今度は下をツルつと光りました。

補償光学を効かせると、タイタンの大気のレンズ効果まで観測できます。誰もこんなことが起こるとは気がつきませんでした。タイタンは幾何学的にはこの星を隠しているのですが、非常に分厚い大気をもつていて、そのなかを光が屈折して回りこんでくる

レンズ効果という現象です。

レーザーガイド星生成装置

私たちは二〇〇〇年に補償光学装置の第一世代の装置を開発しましたが、私自身はその装置を使う機会がほとんどありませんでした。なぜかというと、補償光学を使うには空気のゆらぎを測定する必要があります。それには明るい星を光源にして、その光をみてゆらぎを測定します。明るい星の周辺の観測などには活躍したのですが、私たちがみたい遠くの銀河、遠くの宇宙には、ゆらぎを観察するために必要な明るい星がないんです。ですから、開発した補償光学装置を動かすことができませんでした。

今度の第二世代の装置では、その悔しさを跳ね返すために、すばる望遠鏡からレーザーを撃つて上空で人工的に光る人工星を生成するというとんでもない装置を開発しました。上空九十キロメートルのところにあるナトリウム層にナトリウムD線というオレンジ色のレーザーを撃つと、そこにあるナトリウムがその刺激で光るという原理を使います（図11）。これを使うと、どの方向にすばる望遠鏡を向けても、補償光学めがねをかけて十倍の解像度で観測できます。この装置は一応二年前にできているのですが、大変複雑な装置なので、今、最後の仕上げ調整中です。来年（二〇〇九年）春からこれを使つた本格的な観測を始めるため、現在、私たちの仲間、十何人がハワイで日夜努力を続けております。

実際にすばる望遠鏡からレーザーを撃つた様子の画像が図12です。レーザーガイド星ができる

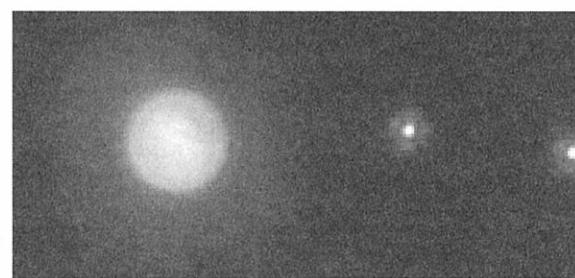
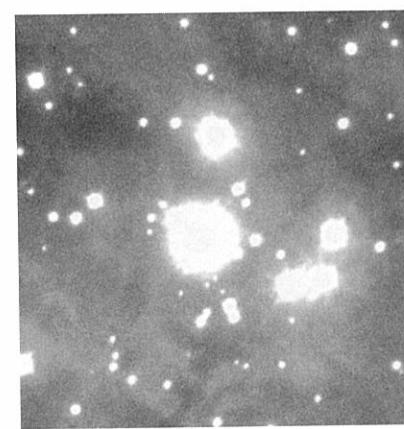
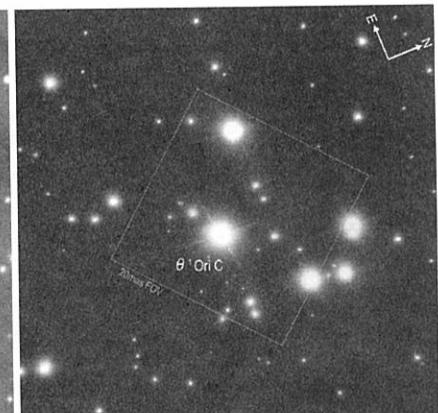


図10 補償光学によるタイタンの大気のレンズ効果の発見 (A. Bouchez et al. 2003)



すばる初期画像 CISCO (1999年)



188素子補償光学系による画像 (2006年)

図9 オリオン大星雲のトラベジウム

補償光学を使うと解像力が格段に改善される (口絵カラー参照)

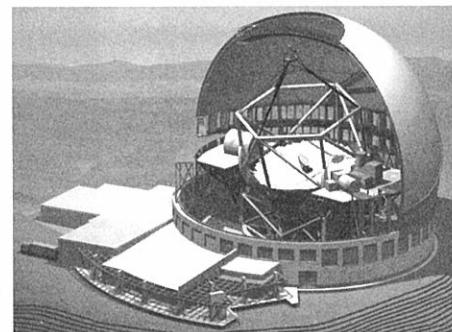
いる証拠です。このレーザーガイド星のナトリウム・ビームはオレンジ色ですが、ナトリウムを光らせるためにはナトリウムが好きな波長にぴったりあわせる必要があります。波長が一千万分の一ずれるとエネルギーは届いていてもナトリウムは食べててくれないので光りません。波長を一千万分の一だけわざとずらしたりあわせたりすると、上空で星が実際に光つたり消えたりします。

十年後の天文学を担う次世代超大型望遠鏡

私たちはこういうハイテク技術をさらに拡大して十年後の天文学を担う次世代の超大型望遠鏡を日米協力で開発したいと相談しています。具体的には、すばる望遠鏡があるハワイの山頂のすぐ隣に直径三十メートルクラスの望遠鏡TMT (Thirty Meter Telescope) という味けもない名前の望遠鏡を開発することについて、カリフオルニア大学、カリフオルニア工科大学、カナダ天文学大学連合と相談を始めています。(図13)。日本はまだ予算がついておりませんが、できれば予算を獲得して一緒に建設したいと準備を始めております。これは、国立天文台が現在総力をあげてチリに建設しているリ波サブミリ波干渉計ALMAと同じくらいの規模の大型計



図12 レーザーガイド星生成確認実験



で小さくなるため 大きな望遠鏡を「ぐる
ほど像をシャープにできます。そうすると、二乗倍集めた光を二乗分の一の狭いと
ころに積み上げられますから、星の明るさの強度は望遠鏡直径の四乗で明るくなり
ます。望遠鏡の値段が直径の一乗ほどで比例しますから、これは大きいものをつく
るほうが割安になります（表3）。それで財務省がお金をだしてくれるといいんです
が、そうは簡単に納得しないと思います。まあそういうことを狙っているわけです。
私たちが見つけた一番遠い銀河は現在の世界記録ですが、すばる望遠鏡では今の
ところ赤いしみにしか見えません。すばる望遠鏡で補償光学を効かせてこれをみに

カリフォルニア大学
カリフォルニア工科大学
カナダ天文学大学連合
(国立天文台も)

直径 30m の主鏡は492枚の分割鏡
マウナケア山頂
2018年 観測開始
建設費用約 1,000 億円

図13 次世代超大型望遠鏡TMTの概念図(TMT提供)

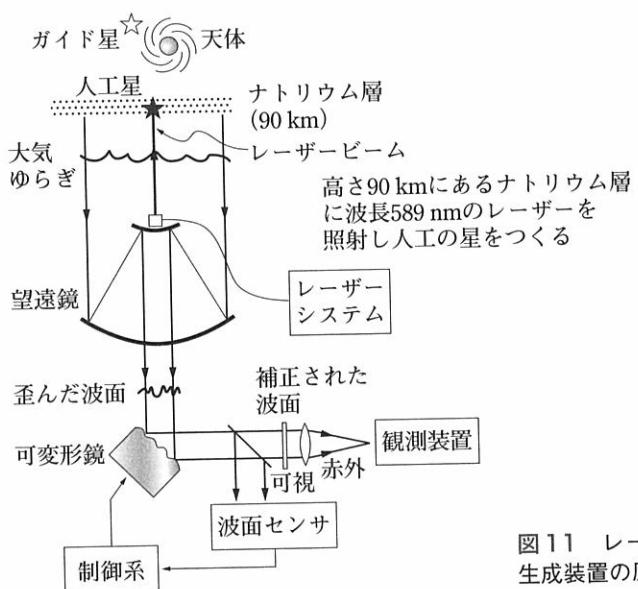


図11 レーザーガイド人工星
生成装置の原理

いく計画を練っています。次世代の三十メートル望遠鏡でこれを補償光学を効かせてフルに観測すると、解像力が六十倍上ります。図14のように赤いしみの内部構造を細かく観察できると期待しています。こういうすばらしい観測が十年後くらいにできる可能性があります。

私も天文の業界にはいつてもう四十年近くになります。大学院で初めて岡山の二メートル望遠鏡を使わせてもらつたとき、「ええつ。大学院生がこんな大きな望遠鏡使つていいの」と非常に感動しました

(図15)。当時、岡山の写真観測では二十一等星が限界でした。やがてCCDカメラを日本で初めて開発し、それを使って観測して二十四等星がうかつて感激しました。従来より三等も暗いものがうかつたので、一九八七年に東大の学内広報に書いたりしています。それから十数年、すばる望遠鏡ができ、そのファーストライトで二十八等星の観測ができました。これは非常に感動的でした。しかし、これから十年後に三十メートル望遠鏡ができると補償光学が動くと、集光力十三倍、解像力三・五倍、感度が百八十倍になります。そうすると、推算では三十三等星が観測できることになります。今のわれわれ

表3 補償光学のメリット

集光力	$A = D^2$
像サイズ	$s = D^{-2}$ (回折限界: $\theta = \lambda / D$)
中心強度	$A / s \propto D^4$
背景光強度	D^0
S/N	D^2

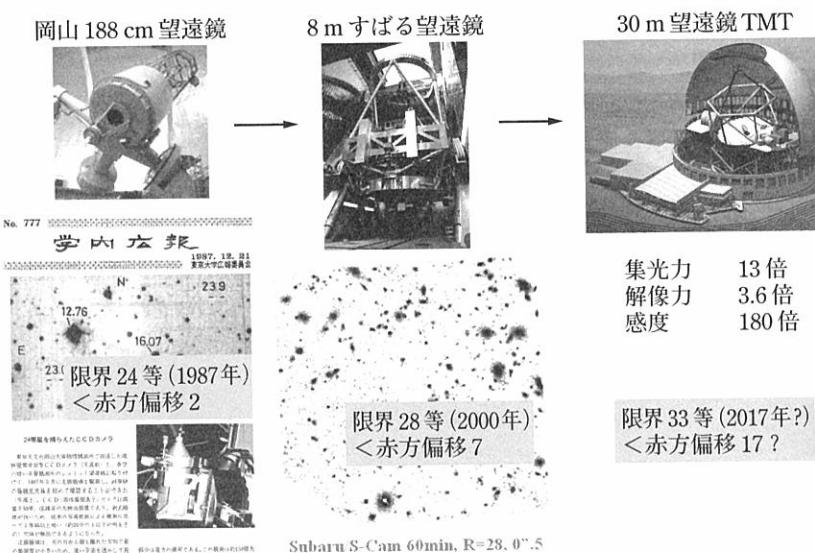


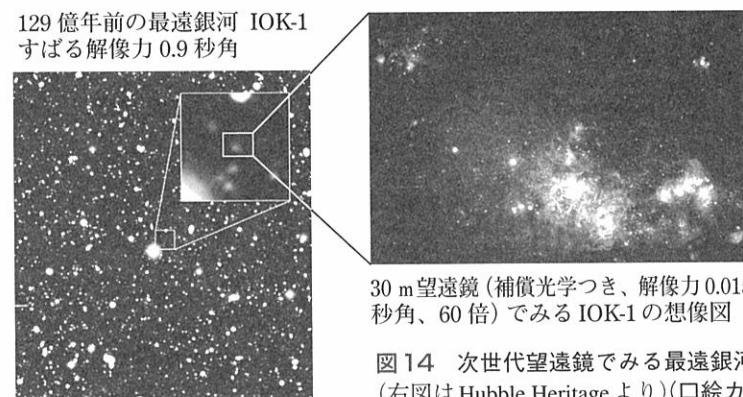
図15 望遠鏡の進化と限界等数

立花補償光学の威力がよくわかりました。素子数が百八十八とかでていましたが、素子数はどういうことを意味しているんですか。素子数を上げればもつともつとよくみえるということになるのだろうと思いますが、それが技術的にはどのようにすれば可能で、先ほどの将来望遠鏡構想のなかではどのように実現されるのでしょうか。

さすがに鋭いご指摘です。その通りです。最初に私たちが開発したのは三十六素子でした。現在、五倍の百八十ハズ素子を開発して、赤外線ではすばる望遠鏡の能力をフルに活かせる性能がでています。しかし、この補償光学

では何がみえるかわからない大変な能力です。まあそういうことを期待しています。

♪とおい銀河 みつけた
宇宙の 夜明けの
でも謎は 深まるばかり♪
お粗末でございました。



30 m 望遠鏡(補償光学つき、解像力 0.015 秒角、60 倍)でみる IOK-1 の想像図

図14 次世代望遠鏡でみる最遠銀河の想像図
(右図は Hubble Heritage より)(口絵カラー参照)

暗黒時代の終わりを告げる 宇宙最初の星



よしだ なおき

東京大学数物連携宇宙研究機構・特任准教授。Ph.D.。

1996年東京大学工学部航空宇宙工学科卒業。2002年ミュンヘン大学大学院天文学専攻博士課程修了。米国ハーバード大学博士研究員、国立天文台日本学術振興会特別研究員、名古屋大学大学院理学研究科助教を経て、08年より現職。

専門は宇宙物理学、観測的宇宙論。大規模数値シミュレーションを用いた宇宙の構造形成の研究に従事。

2008年国際純粹応用物理連合若手科学者賞受賞。

装置を可視光でフルにはたらかせるためには素子数が足りません。必要な素子数は、波長の二乗に逆比例して増えていきます。波長が短くなるほど増えていきます。そして、制御スピードも波長に逆比例して速くなります。今一〇マイクロメートルの赤外線で動く補償光学系を百八十八素子として開発していますが、これを〇・五マイクロメートルの可視光で動かすとすると、素子数は四倍以上、スピードは倍速くなります。それが次の課題です。

さらに、三十メートル望遠鏡で可視光で補償光学を実現しようとすると、必要な素子数は数千～一万ぐらいになると思われます。これは大変な数です。コンピュータの演算処理も高速化が必要です。今的能力でぎりぎりですが、まあ、ムーアの法則で数年で倍になることを考えますと、十年後には十分手が届く速さです。そういうことで、ああいう観測ができるなどを期待しております。

●参考図書

- 1 家正則・『すばる望遠鏡』岩波ジュニア新書四二三（岩波書店、二〇〇三年）
- 2 家正則・「ボケもゆらぎもキャンセルしてしまう補償光学」『自然科学研究機構シンポジウム収録集① 見えてきた！ 宇宙の謎。生命の謎。脳の謎。』一八五～二〇一頁（ケバブロ、二〇〇八年）
- 3 家正則・宇宙の夜明けに迫る－さいはての銀河探査、パリティ十一月号、四〇十四頁、二〇〇八年
- 4 家正則、岩室史英、舞原俊憲、水本好彦、吉田道利編・『シリーズ 現代の天文学 15 宇宙の観測(1)光・赤外天文學』（日本評論社、二〇〇七年）
- 5 嶋作一大・『銀河進化の謎』（東京大学出版会、二〇〇八年）